論文 鉄筋コンクリート造柱梁接合部を含む部分架構の FEM 解析

杉本 訓祥^{*1}· 增田 安彦^{*1}

要旨:鉄筋コンクリート造柱梁接合部の履歴復元力特性に及ぼす,通し主筋の付着性状および柱梁耐力比の 影響を,FEM 解析により検証した。履歴性状の異なる既往実験試験体を対象とした非線形 FEM 解析を行い, 通し主筋の付着特性を変動することで,実験と同様の履歴性状の違いを再現できることを確認した。また, このモデルを元に,柱配筋量や軸力を変動因子としたパラメトリック解析を行った。同一の柱梁耐力比でも, 通し主筋の付着性状が悪いと,スリップ性状が現れることが実験・解析ともに確認され,解析により,通し 主筋の付着強度が大きくても,柱梁耐力比が小さくなると,履歴曲線が逆S字状になることが確認された。 キーワード:非線形 FEM 解析,通し主筋,プレキャスト

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート造(以下, RC 造)建物は, 品質向上や工期短縮のため、プレキャスト化(以下, PCa 化)されることが一般的となっている。著者らは、特に 接合部の PCa 化を目指して検証実験等を進めてきた。 PCa 化にあたっては、鉄筋の接続方法や接続位置、部材 の分割方法やグラウト充填方法など、さまざまな選択肢 がある。そのひとつとして, 柱梁接合部内に梁主筋の貫 通孔を設け、接合部をはさんで反対側の PCa 部材中のス リーブ継手に鉄筋を挿入し、グラウト充填により一体化 する手法について構造性能確認実験を実施し、在来工法 と同等以上の性能を有することを確認してきた¹⁾。一方, 近年の RC 接合部の研究では、接合部を含む架構の構造 性能には、接合部せん断強度ではなく、通し主筋の付着 性能や柱梁耐力比が大きく影響することが指摘されてい る^{例えば 2), 3)}。PCa 化工法では, 柱梁耐力比は変わらない ものの、グラウト充填方法により、通し主筋の付着特性 が変わる可能性がある。

以上のような背景から、本報では、既往実験を対象と した FEM 解析を実施し、通し主筋の付着性能が架構の 履歴復元力特性に及ぼす影響を検討するとともに、柱梁 耐力比によりその性状がどのように変動するか解析的検 討を行うこととした。

2. 十字型架構試験体の FEM 解析

2.1 対象試験体

解析対象とした試験体¹⁾の概要を表-1に示す。在来 工法を模擬した試験体 J-00 と,接合部内のシース管を介 して,梁端部において機械式継手を用いて梁主筋を接続 する PCa 工法を模擬した試験体 J-ME00sh である。

2.2 FEM 解析

(1) 解析モデル

FEM 解析は、大林組開発ソフト「FINAL」⁴を用いて 行った。解析モデルを図-1に示す。試験体形状の対称 性を考慮して、幅方向半分のみをモデル化した。また、 梁端および柱端の定着板から加力用のピン部分は、剛な ソリッド要素とし、ピンの中心に位置する節点を支点ま たは加力点した。

コンクリートは六面体要素,柱・梁主筋は線材要素で モデル化し,せん断補強筋はコンクリートの埋込み鉄筋 としてモデル化した。コンクリートの応力度~歪度関係 は,修正 Ahmad 式⁵⁾によりモデル化した。圧縮強度後の 軟化域については, Nakamura らの提案モデル⁶⁾を用いた。

主筋の線材要素に継手の存在は考慮せず,コンクリートの六面体要素との間には,物理的な大きさを持たない 接合要素を配置し,主筋とコンクリートの間の付着劣化 によるすべりをモデル化した。付着応力度~すべり量関 係は,Naganuma らの手法⁷によりモデル化した。

表-1 解析対象試験体の諸元一覧

試験体名/解析ケース名	J-00∕J-00	J-ME00sh∕J-00sh				
柱形状:B _C ×D _C ×H	$550 \times 550 \times 2200$, $\sigma_{\rm B}$ =65.6N/mm ²					
柱主筋,補強筋,軸力	14-D25(SD490, σ _y =527N/mm ²), 囲-D10@75	(785 級, σ _{wy} =890N/mm²), 一定軸力 : =1815kN				
梁形状:B _B ×D _B ×L	$375 \times 500 \times 3450, \ \sigma_{B}=55.3 \text{N/mm}^{2}$					
梁主筋,補強筋	4+2-D25(SD490, σ _y =527N/mm ²)上下, 4-D1	0@125(785 級,o _{wy} =890N/mm ²)				
継手とシース管	無し	有り, グラウト圧縮強度=118N/mm ²				
- B _C , D _C , B _B , D _B : 柱幅とせい, 梁幅とせい, H: 柱高さ, L: 梁長さ,						

 σ_B : コンクリート圧縮強度、 σ_y 、 σ_{wy} : 王筋およひせん断補強筋の降伏強度

*1 (株) 大林組 技術研究所 博(工) (正会員)



図-1 試験体形状(左)と解析モデル(右)

衣 Z 内省特任の比較								
	在来	А	В					
付着強度:τ _u [N/mm ²]	12.4	12.4	17.7					
周長:∳ [mm]	80	125	80					
付着力:=τ _u ×φ[N/mm]	992	1550	1416					

表-2 付着特性の比較

(2) 主筋の付着特性

対象試験体は, 接合部内の梁通し主筋周囲のグラウト およびシース管の有無が大きな違いのひとつとなってい る。そこで、解析でもこの点を考慮してモデル化するこ ととした。すなわち、試験体 J-00 の場合は、鉄筋周長に 対してコンクリート圧縮強度により定まる付着強度を採 用する一方で、PCa 工法の試験体 J-ME00sh 場合は、図 -2および表-2に示すように、鉄筋周長に対してグラ ウト強度から付着強度を定める場合と、シース管周長に 対してコンクリート強度から付着強度を定める場合の2 通りを想定し、単位長さあたりの付着力が低い方を採用 することとした(図-2および表-2の B を採用)。こ こで,通し主筋の付着強度は靱性指針⁸⁾に従い次式(1)に より求めた。式(1)の付着強度は、異形鉄筋の接合部内通 し主筋に対して適用されるものであるが、シース管を用 いた鉄筋の引き抜き試験に関する既往研究⁹を参考にし て、シース管周面の強度に対しても準用することとした。

$$\tau_u = 0.7 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \cdot \sigma_B^{2/3} \tag{1}$$

ここで、 τ_u :通し主筋の付着強度、 σ_0 :軸応力度、 σ_B : コンクリートまたはグラウトの圧縮強度である[N/mm²]。





また、付着応力度~すべり量関係の包絡線は、図-3 に示すように2通り設定し、強度時すべり量を文献¹⁰ と同様の 1.0mm としたケース(GB)のほか、付着劣化 が早期に生じるケースとして、0.5mm としたケース(BB) も実施した。なお、スパン内の梁主筋の付着強度は、い ずれのモデルも靱性指針による付着割裂強度を用いた。

2.3 FEM 解析結果

(1) 荷重~変形関係

解析の結果得られた層せん断力~層間変形関係を,実 験結果と比較して図-4に示す。図には,梁主筋の降伏 時もプロットした。

実験では,層間変形角 R=1/100 付近で梁一段筋の降伏 が確認され,R=1/50 に至る手前で二段筋の降伏が確認さ れるまでは,耐力・剛性および履歴曲線に顕著な違いは 見られないが,その後の繰り返し載荷において,在来工 法の試験体 J-00 では,逆 S 字状の履歴曲線を描くスリッ プ性状が見られるようになり,大変形時の耐力低下もわ ずかながら見られる。一方試験体 J-ME00sh では,大変 形に至っても,スリップ性状はほとんど見られず,紡錘 形の履歴曲線を描いている。これは2試験体間に表-2 に示すような付着性能の違いがあるためと推察される。

これらの点に着目すると, FEM 解析結果は, 主筋の降 伏点や, 履歴曲線において, 実験結果をよく表現できて いる。すなわち, 一段筋および二段筋が, R=1/100 およ び R=1/50 に至る手前において降伏している点や, 大変 形時の履歴曲線が, 試験体 J-00 ではスリップ性状を示す 一方で, J-ME00sh では紡錘形を保っている点が, よく対 応している。なお, 付着応力度~すべり量関係の違いに ついては, 試験体 J-00 で付着がよくないケース (BB) の方が若干対応がよいものの, 層せん断力~層間変形関 係にはほとんど影響していないと判断できる。



(2) 主筋の負担応力度

各試験体の主筋応力度分布を,実験結果と比較して図 -5に示す。図は,層間変形角 R=+1/50 時と+1/33 時 について示した。また,実験結果は,歪度計測結果に対 して,修正 Menegotto-Pinto のモデル¹¹⁾により応力度に換 算した結果を示した。R=+1/50 時については,両試験体 とも,付着ケースによらず実験結果とよく対応している。 一方,試験体 J-00 については,荷重~変形関係でスリッ プが顕著に現れ始めた層間変形角 R=+1/33 時は実験で は圧縮応力が大きくなっておらず,その点で,付着ケー ス BB の方が, GB よりも対応がよいことがわかる。試験 体 J-ME00sh では, 圧縮応力の解析結果は比較的大きく, やや過大評価しているものの, 概ね対応している。

次に,主筋の応力度分布から求めた柱梁接合部内通し 主筋の平均付着応力度を図-6に示す。試験体 J-00 は, 層間変形角 R=+1/50 を超えると,付着劣化とスリップ が顕著に表れており,解析でも概ね評価できている。特 に,付着ケース BB の方が,正負ともに付着力の劣化が 早期に表れており,対応がよい。一方,試験体 J-ME00sh では,付着力の劣化は見られず,載荷実験範囲で付着が 良好に保たれていたことがわかる。解析でもその傾向は 評価できており,特に付着ケース GB の方が対応がよい。





3. FEM によるパラメトリック解析

前章に示したように、PCa 工法により,在来工法に対 して通し主筋の付着性状が異なる特性を持った試験体に 対して,FEM 解析によりその違いが表現できることが確 認された。そこで,これらの解析モデルをベースとし, 柱配筋を変動因子としたパラメトリック解析を行い,履 歴性状に及ぼす柱梁耐力比の影響を検討する。

3.1 解析対象

解析対象は, 試験体 J-00 および J-ME00sh を対象とし たモデルのうち, 付着ケースを BB とした 2 ケースをベ ースとした。これに対して, 柱梁耐力比が変化するよう に, 柱主筋および軸力を変動した。解析ケース一覧を表 -3 に示す。柱を強くするケースを J-00CS および J-00shCS とした。また, 柱を弱くするケースでは, 軸力 を基準の 1/3 とし, 主筋本数を減らしたケース (J-00CW1, J-00shCW1), さらに径も小さくしたケース (J-00CW2, J-00shCW2) の合計 4 ケースとした。なお, 付着特性は, 前章に示したように, J-00 の適合性がよかったケース BB (ピーク時すべり量を 0.5mm)を用いることとした。

3.2 解析結果

(1) 荷重~変形関係

解析結果のうち,荷重~変形関係を図-7に示す。柱 を強くしたケース(J-00CS および J-00shCS)は、どちら も基準モデルと大きな違いは見られない。通し主筋の付 着が良くない J-00CS は J-00 と同様に逆 S 字状の履歴を 描き,スリップ性状が見られる一方,J-00shCS は紡錘形 の履歴曲線となっている。

一方,柱を弱くしたケースでは,J-00sh シリーズでも, 履歴面積が小さくなり,エネルギー吸収性能に劣る傾向 が見られる。また,いずれのケースでも,柱主筋の降伏 も確認されている。特に,柱を最も弱くしたケースでは, 梁2段筋の降伏に先行して,柱主筋の降伏が生じている。 さらに,包絡線の剛性低下も顕著に見られる。柱梁耐力 比を小さくすると,耐震性能が低下していく様子が,本 パラメトリック解析により確認できた。

(2) エネルギー吸収性状

各解析ケースの等価粘性減衰定数(h_{eq})を算出した。 正負で耐力が異なる場合もあるため,正負各半サイクル

ケース名	基準(2章)		柱・強		柱・弱 1		柱・弱2	
	J-00	J-00sh	J-00CS	J-00shCS	J-00CW1	J-00shCW1	J-00CW2	J-00shCW2
梁	4+2-D25(上下)		同左		同左		同左	
柱	14-D25		14-D29		10-D25		10-D22	
軸力 [kN]	1815		1815		605		605	
柱梁耐力比 *1)	2.15		2.48		1.41		1.16	
接合部 せん断余裕度 *2)	1.33		1.33		1.33		1.33	
通し主筋 付着余裕度 *3)	1.04	1.48	1.04	1.48	0.98	1.43	0.98	1.43

表-3 パラメトリック解析のケース一覧

*1) 危険断面が曲げ終局モーメントに達するときの節点モーメントの比。

*2) 靱性指針⁸⁾による接合部せん断強度の梁曲げ終局時せん断力に対する比。

*3) 靱性指針⁸による通し主筋の付着強度の梁曲げ終局時平均付着応力度に対する比。J-00sh シリーズでは, グラウト強度による。



分について算出した。なお、ここでは、同一振幅の2回 目のサイクルについて算出した。

計算結果を図-8に示す。図より,J-00 シリーズでは, 柱を強くしてもあまり性状は変わらないが,柱を弱くす ることで,わずかながら h_{eq} が低下していることがわか る。一方,J-00sh シリーズでは,柱を強くしても,ほと んど性能が変わらず,柱を弱くすることで,顕著に h_{eq} が低下していることがわかる。

また,計算結果を,各変動因子(柱梁曲げ耐力比および通し主筋付着余裕度)との関係にして,図-9に示す。 層間変形角 R=1/100 までは,変動因子によらずほぼ一定 となっているが,R=1/50 以降では,変動因子による違い が顕著に見られる。すなわち,柱梁耐力比や付着余裕度 の上昇に伴い,同じ変形角における等価粘性減衰定数は 大きくなる傾向が明瞭に確認できる。

5. まとめ

RC 造柱梁接合部部分架構試験体の既往実験を対象とした FEM 解析を行い,履歴曲線に及ぼす主筋の付着特

性の影響を検証した。さらに、対象試験体の解析モデル をベースとしたパラメトリックスタディを行い、柱梁耐 力比の変動による履歴曲線に対する影響を検討した。得 られた知見を以下に示す。

- (1) 既往実験を対象とした解析では、接合部におけるシ ース管とグラウトの存在を、通し主筋の付着特性モ デルにより表現した。解析の結果、実験で見られた 履歴性状の違いが再現でき、鉄筋降伏時の荷重・変 位とも精度良く評価できた。
- (2) 上述の相違点は、実験結果において、鉄筋の応力度 分布や平均付着応力度にも表れており、解析でも再 現することができた。特に、付着応力度~すべり量 関係は、ピーク時すべり量を1.0mmとする従来の方 法よりも、0.5mm 程度とし、付着劣化を早くした方 が、本実験に対しては適合性がよい結果となった。
- (3) パラメトリック解析では、柱主筋量を増やし、柱梁 耐力比を 2.5 程度まで大きくしても、基準モデル(柱 梁耐力比 2.1 程度)以上に性能は向上しなかった。



(4) 同じくパラメトリック解析では、柱主筋量を減らし、 柱梁耐力比を1.4 および1.1 程度に小さくした結果、 エネルギー吸収性能の劣る結果となり、通し主筋の 付着強度が高いモデルでも性能が低下した。

参考文献

- 杉本訓祥・増田安彦・勝俣英雄・森岡徹:梁端部に 機械式継手を設けた柱梁接合部架構の静的載荷実 験, コンクリート工学, Vol.32, No.2, pp.247-252, 2010
- 塩原等・楠原文雄:「鉄筋コンクリート造の壁はり 接合部等の耐力評価に関する実験」の実験実施報告, ビルディングレター,第557号, pp.2-14, 2012.05
- 北山和宏:鉄筋コンクリート十字形柱・梁単位架構の等価粘性減衰定数の定量評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.457-458、2003.09
- 4) 長沼一洋・米澤健次・江戸宏彰: RC 構造物の三次 元繰返し FEM 解析の精度向上 その3 非直交ひ び割れモデルの改良と付着すべりモデルの導入,日 本建築学会大会学術講演梗概集,構造IV, pp.427-428, 2003.09
- 5) 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひず み関係,日本建築学会構造系論文集,第 474 号, pp.163-170, 1995.08

- Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, Oct. 1990
- Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 586, Aug. 2004
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証 型耐震設計指針・同解説,1998
- 9) 池田秀樹・森岡徹・増田安彦・杉本訓祥:シース管を設けたコンクリートからの鉄筋引抜試験,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.311-312,2008.09
- 杉本訓祥・増田安彦・津田和明・勝俣英雄:鉄筋コンクリート梁部材の多数回繰り返し載荷時の挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.241-246, 2011
- Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. V. and Popov, E.
 P.: Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82-83, Univ. of California, Barkeley, Nov. 1982